

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení

Měření a vyhodnocení ztrátového součinitele na vzduchové trati

Measurement and evaluation of the local losses coefficient on the
air line

Student:

Rostislav Martiník

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Marian Bojko, Ph.D.

Ostrava 2014

Zadání bakalářské práce

Student: **Rostislav Martiník**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2302R007 Hydraulické a pneumatické stroje a zařízení
Téma: **Měření a vyhodnocení ztrátového součinitele na vzduchové trati**
Measurement and Evaluation of the Local Losses Coefficient on the Air Line

Zásady pro vypracování:

1. Zpracování teorie místních ztrát při proudění vzduchu.
2. Metody měření tlakové difference a průtoku při proudění vzduchu. Charakteristika měřících zařízení.
3. Výběr prvků k měření a vyhodnocení ztrátového součinitele. Návrh experimentální měřicí tratě k měření charakteristiky při proudění vzduchu (umístění měřidel a vyhodnocení měřených veličin).
4. Realizace měření na vzduchové trati pro vybrané prvky.
5. Vyhodnocení výsledků měření místních ztrát (grafy, tabulky).

Seznam doporučené odborné literatury:

1. MIKAN, J. *Měření plynů*. Říčany u Prahy, 2003, 386 s. ISBN 80-7328-053-1.
2. DRÁBKOVÁ, S. a kol. *Mechanika tekutin - učební text*. VŠB-TU Ostrava, 2007, 260 s. ISBN 978-80-248-1508-4.
<http://vyuka.fs.vsb.cz/course/category.php?id=10>
3. *Měření třecích ztrát na vzduchové trati – návod*, <http://www.338.vsb.cz/PDF/SKRIPTA01.pdf>.
4. JANALÍK, J. *Měření tekutinových mechanismů*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 1995, 155 s.
5. JENČÍK, J. KUHN, L. *Technická měření ve strojírenství*. Praha. SNTL Praha. 1982. 580 s.
6. NOSKIEVIČ, J. *Mechanika tekutin*. Praha. SNTL Praha, 1987. 354 s.
7. NOSKIEVIČ, J. JANALÍK, J. RÝC, Z. ŠTÁVA, P. *Mechanika tekutin příručka pro laboratorní cvičení*. Skripta VŠB-TU Ostrava, 1987, 152 s. ISBN-80-03-00308-3.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Marian Bojko, Ph.D.**

Datum zadání: 17.02.2014

Datum odevzdání: 19.05.2014



doc. Dr. Ing. Lumír Hružík
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě: 15. 5. 2014

Martiník

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě: 15. 5. 2014

Martíník

podpis studenta

Rostislav Martiník

Skotnice 1067/6

Polanka nad Odrou, 725 25

Poděkování:

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Marianu Bojkovi, Ph.D. za odborné vedení a cenné rady, které mi pomohly při psaní této práce.

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

MARTINÍK, R. *Měření a vyhodnocení ztrátového součinitele na vzduchové trati: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení, 2014, 37 s. Vedoucí práce: Bojko, M.

Cílem předložené bakalářské práce je měření a vyhodnocení ztrátového součinitele na vzduchové trati u vybraných prvků. Teoretická část bakalářské práce se zabývá teorií hydraulických ztrát při proudění skutečné tekutiny a definicemi třecích a místních ztrát. Práce je rovněž zaměřená na metody měření tlaku a průtoku, a jednotlivá měřidla. Praktická část je zaměřená na návrh jednotlivých experimentálních měřících tratí a jejich realizaci, včetně výběru měřících prvků a měřidel. Tato část bakalářská práce se také zabývá provedením experimentálního měření a celkovým vyhodnocením dosažených výsledků (porovnání tlakové ztráty a ztrátového součinitele).

Klíčová slova: ztrátový součinitel; tlaková ztráta; třecí ztráta; místní ztráta; tlak; průtok; Reynoldsovo číslo; experiment

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

MARTINÍK, R. *Measurement and evaluation of the local losses coefficient on the air line: bachelor thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of mechanical engineering, department of Hydromechanics and Hydraulic equipment, 2014, 37 p. Supervisor: Bojko, M.

The aim of this thesis is to measure and evaluate the loss coefficient on the selected elements of the air line. Theoretical part of the thesis deals with the theory of hydraulic losses during the flow of a real fluid and it also mentions definitions of frictional and local losses. This thesis is also focused on methods of measuring pressure and flow, and the individual gauges. In the practical part suggestion and realization of individual experimental measuring lines is included and suitable elements and gauges are chosen. This part of the thesis is also aimed at experimental measuring and overall evaluation of achieved results (comparison of pressure loss and the loss coefficient).

Keywords: loss coefficient; pressure loss; frictional loss; local loss; pressure; flow; Reynolds number, experiment

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Teorie hydraulických ztrát při proudění skutečné tekutiny.....	2
2.1	Definice třecích ztrát.....	3
2.2	Definice místních ztrát.....	4
3	Měření tlaku a charakteristika měřidel.....	6
3.1	Pístové tlakoměry	7
3.2	Deformační tlakoměry	7
3.2.1	Trubicové tlakoměry	8
3.2.2	Membránové tlakoměry.....	9
3.2.3	Krabicové tlakoměry	9
3.2.4	Vlnovcové tlakoměry	10
3.3	Kapalinové tlakoměry	10
3.3.1	U-trubicový tlakoměr	11
3.3.2	Nádobkové tlakoměry	11
3.3.3	Kapalinové tlakoměry se šikmou trubicí.....	12
3.4	Převodníky tlaku	12
3.4.1	Odporové převodníky tlaku – tenzometry	13
3.4.2	Indukční převodníky tlaku.....	13
3.4.3	Kapacitní převodníky tlaku	13
4	Měření průtoku tekutin a charakteristika měřidel	14
4.1	Objemová metoda měření průtoku tekutin	14
4.2	Rychlostní metoda měření průtoku.....	14
4.2.1	Clony	15
4.2.2	Dýzy	15
4.2.3	Venturiho trubice.....	16
4.2.4	Kolenové průtokoměry	16

4.2.5	Tepelné průtokoměry.....	16
5	Experimentální měření	18
5.1	Měření tlakové ztráty a tlaku před průtokoměrem.....	18
5.2	Měření průtoku vzduchu	18
6	Návrh experimentální měřicí tratě	19
6.1	Měřicí trať pro koleno 45°	19
6.2	Měřicí trať pro koleno $67,5^\circ$	20
6.3	Měřicí trať pro koleno $87,5^\circ$	21
7	Specifikace prvků a měřidel.....	22
8	Postup měření.....	25
8.1	Postup měření na trati pro koleno 45°	25
8.2	Postup měření na trati pro koleno $67,5^\circ$ a $87,5^\circ$	25
9	Definice vztahů a výpočtů.....	26
9.1	Popis vztahů.....	26
9.2	Příklad výpočtů	27
9.2.1	Vyhodnocení měření pro koleno 45°	28
9.2.2	Vyhodnocení měření pro koleno $67,5^\circ$	30
9.2.3	Vyhodnocení měření pro koleno $87,5^\circ$	32
9.2.4	Porovnání výsledků místních ztrát (kolena)	34
10	Závěr	36
11	Použitá literatura	37

Seznam použitých označení veličin

Označení veličiny	Název veličiny	Jednotka
C_K	průtokový součinitel	1
d	průměr	m
e_z	měrná ztrátová energie	$J \cdot kg^{-1}$
F	síla	N
g	tíhové zrychlení	$m \cdot s^{-2}$
h	výška	m
h_{mz}	rychlostní výška	m
h_z	ztrátová výška	m
k	absolutní drsnost stěny potrubí	mm
l	délka	m
l_e	ekvivalentní délka potrubí	m
m	hmotnost	kg
p	tlak	Pa
p_z	tlaková ztráta	Pa
Δp	tlaková difference	Pa
Q_m	hmotnostní průtok	$kg \cdot s^{-1}$
Q_N	objemový průtok při normálních podmínkách	$kg \cdot s^{-1}$
Q_V	objemový průtok	$m^3 \cdot s^{-1}$
r	poloměr	m
R	poloměr zakřivení	m
Re	Reynoldsovo číslo	1
Re_{kr}	kritická hodnota Reynoldsova čísla	1
S	plocha	m^2

t	čas	s
T	teplota	K
T_N	normální teplota	K
v	rychlost proudění	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
v_s	střední rychlost proudění	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
V	objem	m^3
α	úhel	°
η	dynamická viskozita	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
λ	součinitel tření	1
ν	kinematická viskozita	$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
ρ	hustota	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
ρ_v	hustota vzduchu	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
σ	povrchové napětí	$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$
ζ	ztrátový součinitel	1
ζ_m	ztrátový součinitel pro místní ztráty	1
ζ_t	ztrátový součinitel pro ztráty třením	1

1 Úvod

Tato bakalářská práce poskytuje základní informace týkající se definování hydraulických ztrát při proudění skutečné tekutiny, jejich výpočtů, způsobu měření tlaku, průtoku, rozdělení a druhů měřidel používaných v technické praxi.

Úvodní kapitola nastiňuje problematiku teorie hydraulických ztrát při proudění skutečné tekutiny. První část této kapitoly je zaměřena na definici a popis. Druhá část je věnována třecím ztrátám, kdy charakterizuje okolnosti, za kterých k těmto ztrátám dochází a definuje způsob jejich určení. Poslední část kapitoly je věnována popisu místních ztrát, příčiny vzniku a způsob jejich určení.

Třetí kapitola obsahuje popis fyzikální veličiny tlaku jako stavovou veličinu a způsob měření tlaku. Dále je věnována rozdělení tlakoměrů podle druhu měřeného tlaku, výstupního signálu a funkčního principu. Dále kapitola obsahuje bližší charakteristiky jednotlivých vybraných tlakoměrů.

Ve čtvrté kapitole je popsán průtok a princip jeho měření. V kapitole je popsán rozdíl mezi objemovým a hmotnostním průtokem. Dále jsou zde popsány jednotlivé vybrané průtokoměry používané v praxi, způsob měření a jejich vyhodnocování.

Pátá kapitola je věnovaná praktické části této bakalářské práce. Zde je popsán cíl praktické části a to měření ztrátového součinitele místních ztrát zvolených prvků na vzduchové trati. Dále jsou v kapitole popsány měřené parametry.

Následující šestá a sedmá kapitola je zaměřena na návrh jednotlivých experimentálních měřících tratí, charakteristiku jednotlivých měřících prvků a měřidel sloužící pro sestavení tratě. Tratě byly sestaveny v laboratoři mechaniky tekutin v místnosti E 306.

Osmá kapitola je věnována postupu měření v jednotlivých krocích, za účelem získání hodnot pro výpočet součinitele místních ztrát.

Devátá kapitola obsahuje definici vztahů a výpočtů. Jednotlivé výpočty, tabulky obsahující naměřené a vypočtené hodnoty, grafické závislosti s vyhodnocením jednotlivých změřených prvků.

Celkové zhodnocení této bakalářské práce je popsáno v závěru.

2 Teorie hydraulických ztrát při proudění skutečné tekutiny

Při proudění skutečné tekutiny vznikají vlivem viskozity hydraulické odpory (ztráty). Jsou to síly působící proti pohybu částic tekutiny. Velikost těchto ztrát se často vyjadřuje ekvivalentní tlakovou diferencí nazývanou tlaková ztráta. Ke ztrátám tlaku dochází při proudění tekutin přímým potrubím a v místních odporech. Jako místní odpory můžeme brát tvarové kusy, armatury a místa v potrubí, kde dochází k náhlé změně průřezu [1].

U výpočtu tlakových ztrát se vychází z Bernoulliho rovnice pro skutečnou tekutinu, která je ve tvaru:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + g \cdot h_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + g \cdot h_2 + e_z \quad (2.1)$$

Vstupní parametry označujeme indexy 1 a výstupní parametry indexy 2, p tlaky, v rychlosti a h výšky stanovené k těmto průřezům. ρ značí hustotu proudící tekutiny, g tíhové zrychlení a e_z měrnou ztrátovou energii mezi průřezy 1 a 2 [1].

Při proudění skutečných tekutin vzniká ztráta energie, která je způsobená prací třecích sil. Mechanická energie proudící tekutiny se snižuje a ztrátová energie se mění v teplo. Jedná se o nevratnou změnu. Ztrátová energie se vztahuje na jednotku hmotnosti, tíhy nebo objemu a platí vztah [1]:

$$e_z = \frac{p_z}{\rho} = g \cdot h_z = \zeta \cdot \frac{v_s^2}{2} \quad (2.2)$$

Jako hydraulické odpory zahrnujeme všechny účinky způsobující ztrátu energie při proudění skutečných tekutin. Tyto ztráty se projevují jako úbytek tlakové energie nebo úbytek kinetické energie [1].

Hydraulické odpory se dělí na odpory třecí a odpory místní. Místní odpory nastávají v místech, kde se mění rychlost, směr rychlosti, případně velikost i směr rychlosti proudící kapaliny [1].

Ztrátový součinitel ζ místního odporu závisí na geometrii uvažovaného místa a proudění (druh kapaliny, rychlost), p_z je tlakový ztráta, h_z ztrátová výška a v_s je střední rychlost, který se vypočítá podle vztahu [1]:

$$Q_v = S \cdot v_s \quad [\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.3)$$

2.1 Definice třecích ztrát

Třecí ztráty jsou závislé na délce potrubí a na ztrátovém součiniteli. Ten je přímo úměrný délce potrubí a nepřímo úměrný průměru d .

Ztrátový součinitel pro ztrátu třením je dán vztahem:

$$\zeta_t = \lambda \cdot \frac{l}{d} \quad [1] \quad (2.4)$$

λ je třecí součinitel, l délka potrubí a d světlost potrubí.

Potom je tlaková ztráta daná vztahem:

$$p_z = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v_s^2}{2} \cdot \rho \quad [\text{Pa}] \quad (2.5)$$

Pro ztrátovou výšku platí:

$$h_z = \frac{p_z}{\rho g} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{v_s^2}{2g} \quad [\text{m}] \quad (2.6)$$

Součinitel tření λ je závislý na typu proudění, které je dáno Reynoldsovým číslem, a drsností povrchu daného systému. Hodnota Reynoldsova čísla je vyjádřena vztahem:

$$\text{Re} = \frac{v_s \cdot d}{\nu} \quad [1] \quad (2.7)$$

Kinematická viskozita je označena písmenem ν . Je dána poměrem dynamické viskozity η a hustotou tekutiny ρ :

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}] \quad (2.8)$$

Reynoldsovo číslo určuje typ proudění, kde kritická hodnota pro proudění v potrubí je rovná 2320. Až do hodnoty $\text{Re}=2320$ se jedná o laminární proudění vyznačující se tím, že rovnoběžné vrstvy tekutiny po sobě kloužou a k přenosu hybnosti ve směru kolmém na směr proudění dochází jen na molekulární úrovni. U laminárního proudění v potrubí s kruhovým průřezem je součinitel tření dán vztahem [1]:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}} \quad [1]; \quad \text{Re} < \text{Re}_{\text{kr}} = 2320 \quad (2.9)$$

Když Re překročí kritickou hodnotu 2320, přechází proudění z laminárního na turbulentní. Při turbulentním proudění se proudnice navzájem promíchávají. Částice tekutiny vykonávají při proudění kromě posouvání i složitý vlastní pohyb, který vede ke vzniku víru. V případě turbulentního proudění se třecí součinitel λ pro hladké potrubí vypočítá podle vztahu [1]:

$$\lambda = \frac{0,1364}{\sqrt[4]{\text{Re}}} \quad [1]; \quad \text{Re} > \text{Re}_{\text{kr}} = 2320 \quad (2.10)$$

V případě hydraulicky drsného potrubí se třecího součinitele λ vypočte podle Altšulova vzorce:

$$\lambda = 0,1 \left(\frac{100}{\text{Re}} + \frac{k}{d} \right)^{0,25} \quad [1]; \quad \text{Re} > \text{Re}_{\text{kr}} = 2320 \quad (2.11)$$

kde k značí absolutní drsnost stěny potrubí.

2.2 Definice místních ztrát

Místní ztráta je důsledek deformace rychlostního pole. Je zapříčiněna překážkou v potrubí působící na proudění (kohouty, ventily, kolena atd.). Může také docházet k náhlé nebo pozvolné změně průměru potrubí. Takové části potrubí vyvolávají rozptyl energie. Ty nazýváme místními ztrátami. Rozptyl energie způsobený místními odpory bývá mnohonásobně větší než rozptyl energie způsobený třecími odpory [1].

Místní ztráty se určují pomocí rychlostní výšky podle vztahu:

$$h_{\text{mz}} = \zeta_{\text{m}} \cdot \frac{v_s^2}{2g} \quad [\text{m}] \quad (2.12)$$

nebo měrnou ztrátovou energii:

$$e_z = g \cdot h_z = \zeta_{\text{m}} \cdot \frac{v_s^2}{2} \quad [\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}] \quad (2.13)$$

Ztrátový součinitel ζ_m místních ztrát je závislý na druhu odporu, na jeho geometrických parametrech, na drsnosti stěn, tvaru rychlostního pole při vstupu do odporu a na hodnotě Reynoldsova kritéria. Vliv Re se projevuje především při malých hodnotách tohoto kritéria. Při vysokých hodnotách Re jsou místní ztráty $\zeta_m = \text{konst.}$ [1].

Místní odpory jsou také vyjádřeny ekvivalentní délkou potrubí l_e . Z rovnosti tlakových ztrát se vypočítá ekvivalentní délka potrubí [1].

$$\zeta_m \cdot \frac{v^2}{2g} = \lambda \cdot \frac{l_e}{d} \cdot \frac{v_s^2}{2g} \quad (2.14)$$

$$l_e = \frac{\zeta_m}{\lambda} \cdot d \quad [\text{m}] \quad (2.15)$$

Za součinitel tření a průměr potrubí se dosadí hodnoty platící pro rovný úsek potrubí. Místní ztráty se mohou vyjádřit z přítokové rychlosti v_1 nebo odtokové rychlosti v_2 díky změně průřezu která způsobuje změnu průtočné rychlosti [1].

$$h_{mz} = \zeta_1 \cdot \frac{v_1^2}{2g} = \zeta_2 \cdot \frac{v_2^2}{2g} \quad [\text{m}] \quad (2.16)$$

Vztah pro přepočet ztrátových součinitelů je následující:

$$\zeta_1 = \zeta_2 \cdot \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2 = \zeta_2 \cdot \left(\frac{S_1}{S_2}\right)^2 \quad [1] \quad (2.17)$$

3 Měření tlaku a charakteristika měřidel

Tlak je odvozená veličina definována jako síla F působící kolmo na plochu S . Definici můžeme vyjádřit prostřednictvím hydrostatického sloupce kapaliny o hustotě ρ a výšce h a gravitačním zrychlením g [2].

$$p = \frac{F}{S} \text{ [Pa]} \quad (3.1)$$

$$p = \rho \cdot g \cdot h \text{ [Pa]} \quad (3.2)$$

Základní jednotkou v soustavě SI je pascal [Pa] [2].

Měřený tlak lze rozdělit do několika skupin:

- Absolutní nulový tlak -tlak v prostoru, ve kterém není hmota.
- Absolutní tlak -tlak měřený od absolutní nuly.
- Barometrický tlak -tlak zemské atmosféry.
- Přetlak -tlak vyšší než barometrický.
- Podtlak -tlak nižší než barometrický.

Rozdělení měřidel tlaku

Podle druhů měřeného tlaku definujeme:

- Tlakoměry absolutního tlaku
- Vakuometry
- Barometry
- Manometry
- Diferenční tlakoměry

Podle výstupního signálu definujeme:

- Mechanické
- Hydrostatické
- Elektrické

Podle funkčního principu definujeme:

- Pístové tlakoměry
- Deformační tlakoměry
- Kapalinové tlakoměry
- Převodníky tlaku
- Ostatní (speciální)

3.1 Pístové tlakoměry

Měřený tlak působí na píst vyvážený závažím nebo pružinou. Z velikosti vyvážení a z rozměrů pístu lze určit měřený tlak podle vztahu:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{m \cdot g}{S} \quad [\text{Pa}] \quad (3.3)$$

Vyvážený stav tlakoměru nastane, jestliže síla způsobena hmotností závaží přestaví píst do rovnovážného stavu, který je dán předepsanou polohou. Tato předepsaná poloha je na tlakoměru vyznačena např. dvěma protichůdnými střílkami protějších trojúhelníků. Velikost tlaku p který působí na píst je pak dán vztahem [3]:

$$p = \frac{m}{S} \cdot g \quad [\text{Pa}] \quad (3.4)$$

kde m je hmotnosti pístu a závaží, S účinná plocha pístu.

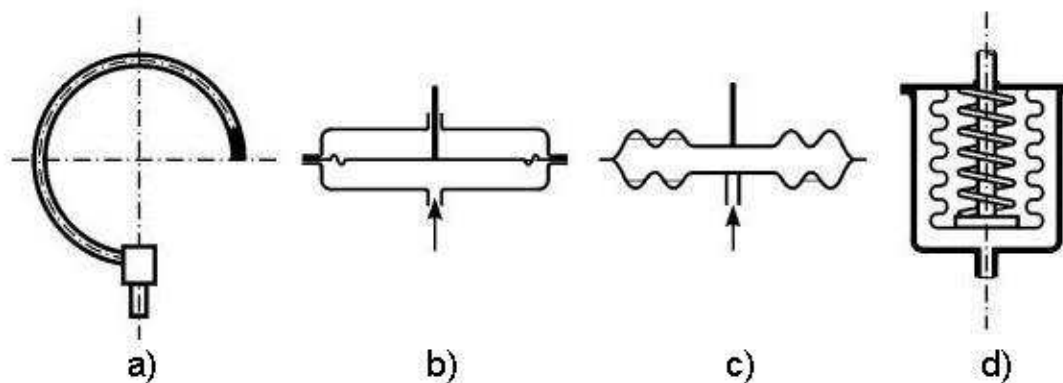
3.2 Deformační tlakoměry

Deformační tlakoměry jsou založeny na principu pružné deformace, díky níž dochází ke změně geometrického tvaru u vhodných prvku, které měří tlak vlivem působení měrného tlaku. Aby nedošlo k poškození tlakoměrů, musí být namáhání v rozsahu pružných deformací [4].

Nejčastěji používané tvary deformačních prvku jsou trubicové, membránové, krabicové a vlnovcové (Obr. 3.1).

Deformace pružných členů bývá poměrně malá (1 až 5 mm), proto je potřeba vkládat do měřicího systému mechanický převod, který je častokrát tvořen pákou a ozubeným převodem. Výhodou těchto tlakoměrů je velká přestavující síla, která umožňuje registraci a regulaci. Používají se pro měření kapalin a plynů [3].

Deformační prvky se zhotovují z uhlíkových a niklových ocelí, z mosazi, z fosforového a beryliového bronzu a dalších vhodných slitin. Výchylka se zpracovává buď převodem na přímý ukazatel, nebo převodem na elektrický popř. pneumatický signál, který se dále vyhodnocuje. Provozně jsou tyto tlakoměry bezpečné, ale u měření vysokých tlaků je doporučeno vkládat tyto tlakoměry do ochranných pouzder opatřené explozivními otvory [3].



Obr. 3.1: Základní tvary deformačních prvků: a) trubicový, b) membránový, c) krabicový d) vlnovcový [5]

Hlavní výhody deformačních tlakoměrů jsou:

- Robustnost provedení
- Malé rozměry a malá hmotnost
- Jednoduchost a spolehlivost v provozu
- Jednoduchá obsluha i údržba
- Velký měřicí rozsah
- Dostatečná přesnost

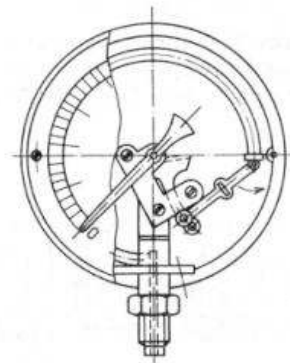
Mezi nevýhody patří:

- Elastické dopružování
- Trvalé deformace měřicího prvku během provozu

3.2.1 Trubicové tlakoměry

Trubicové tlakoměry se vyznačují jednoduchou konstrukcí (Obr. 3.2), která obsahuje deformační prvek tzv. Bourdonovu trubici. Používají se zpravidla pro měření přetlaku. Jedná se o trubici s nekruhovým průřezem stočenou do kruhového oblouku se středovým úhlem nejčastěji 270° . Jeden konec je spojen se vstupem tlaku a druhý uzavřen a spojen přes převodové ústrojí s ukazatelem tlaku na stupnici [4].

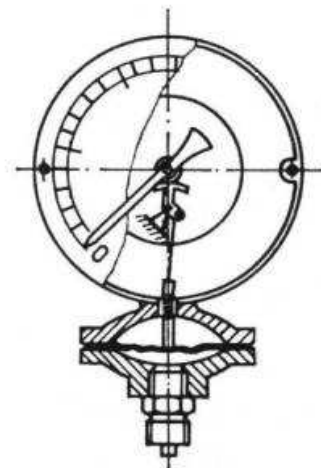
Přivedený tlak působí na trubici mající tendenci se narovnávat. Této situaci říkáme Bourdonův jev. Vychýlení konce trubice je funkcí středového úhlu. Tlakový rozsah je dán tloušťkou stěny trubice, která může být různá. Jako mechanický převod může být použit pákový převod nebo ozubený převod [3].



Obr. 3.2: Trubicový tlakoměr [5]

3.2.2 Membránové tlakoměry

Jsou to tlakoměry (Obr. 3.3), jejichž deformační prvek je membrána z pružného materiálu. Díky ní je možno měřit jak přetlak, tak i podtlak. Materiál membrány určuje rozsah měření a může být kovový s kruhovými vlysy mající vlastní tuhost, nebo membrány z plastových a pryžových materiálů. V jejich případě musí být tuhost nastavena pružinou nacházející se nad membránou. Průhyb membrány za působení tlaku je přenášen na ukazatel mechanickým převodem, který je nejčastěji tvořen pákovým a ozubeným

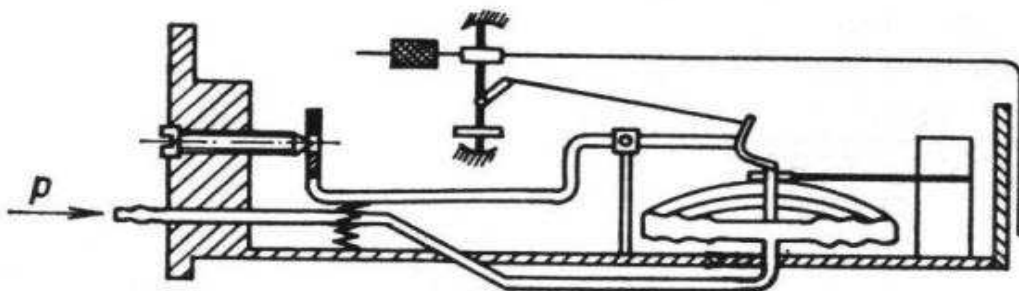


Obr. 3.3: Membránový tlakoměr [5]

převodem. Membránové tlakoměry jsou odolné vůči otřesům a kmitům díky malé setrvačné hmotnosti membrány [3].

3.2.3 Krabicové tlakoměry

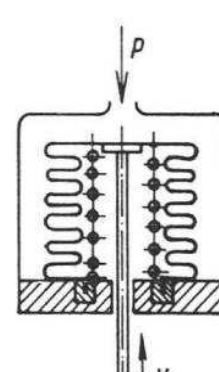
Jedná se o nejcitlivější deformační tlakoměry tvořeny plochou kulatou krabíci. Jejich dna jsou tvořena dvěma membránami tj. zvlněnými plechy. Tlak přivedený do krabice způsobuje pružnou deformaci na dvojici membrán. V závislosti na přetlaku nebo podtlaku se membrána buď zvyšuje, nebo snižuje. Průhyb membrán je na ukazatel přenášen pákovým a ozubeným převodem (Obr. 3.4) [3].



Obr. 3.4: Krabicový tlakoměr [5]

3.2.4 Vlnovcové tlakoměry

Vlnovcové tlakoměry (Obr. 3.5) využívají tenkostěnný kovový vlnovec (měch) jako deformační prvek, který je umístěn v pouzdře tlakoměru. Tuhost tlakoměru se dá nastavit vložením pružiny do vlnovce tlakoměru a tím měnit rozsah měřeného tlaku. Přetlak nebo podtlak přiváděný do pouzdra působí na vnější stěny vlnovce a pružně jej deformuje. Tato deformace se přenáší pomocí táhla na ukazatel tlakoměru [3].



Obr. 3.5: Vlnovcový tlakoměr [5]

Vlnovcové tlakoměry jsou zvláště vhodné pro měření menších tlaků. Hodnota měřeného tlaku zpravidla nepřesahuje 500 kPa [3].

3.3 Kapalinové tlakoměry

Kapalinové tlakoměry jsou jednoduché a přesné přístroje, které jsou především laboratorní pro měření nízkých tlaků. Měřený tlak je dán výškou hydrostatického sloupce h a hustotou tlakoměrné kapaliny, u níž je důležité zbarvení (pro čtení na stupnici) a bod tuhnutí. Ten omezuje používání tlakoměrů za určitých teplot [2].

Chyby měření těmito tlakoměry jsou způsobeny kapilární aktivitou tlakoměrné kapaliny, které se zahrnují do měřících nejistot. Pro depresní výšku kapaliny v kapiláře platí vztah:

$$h = 2 \cdot \frac{\sigma}{r \cdot \rho \cdot g} \quad [\text{m}] \quad (3.5)$$

kde σ značí povrchové napětí v místě, v němž dochází ke styku dvou prostředí, r je vnitřní poloměr trubice [2].

Kapalinové tlakoměry se dělí podle různých hledisek např. podle počtu kapalin na jednokapalinové a dvoukapalinové. U dvoukapalinových musí být kladen důraz na rozdílnou hustotu obou kapalin a druhu, aby nedocházelo k mísení. Jako měřící médium se používají různé tlakoměrné kapaliny mající rozdílnou hustotu při 20°C [2].

- Alkohol - $\rho = 800 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
- Voda - $\rho = 995 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
- Tetrachlor - $\rho = 1\,600 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
- Rtuť - $\rho = 13\,595 \quad [\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$

3.3.1 U-trubicový tlakoměr

Jedná se o průhlednou skleněnou trubici popřípadě trubici z plexiskla ve tvaru U. Je naplněna tlakoměrnou kapalinou. Měřený tlak p_1 se přivádí do jednoho konce U-trubice a na druhý konec působí atmosférický tlak p_2 . Měřený tlak se vypočítá z rozdílu výšky kapaliny podle vztahu [3]:

$$p = (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \cdot h \quad [\text{Pa}] \quad (3.6)$$

kde h je výška sloupce kapaliny, ρ_2 je hustota tlakoměrné kapaliny a ρ_1 hustota měřeného plynu.

Pokud působí 2 rozdílné tlaky p_1 a p_2 současně, potom se difference tlaku vypočítá ze vztahu:

$$\Delta p = p_1 - p_2 = h \cdot (\rho_2 - \rho_1) \cdot g \quad [\text{Pa}] \quad (3.7)$$

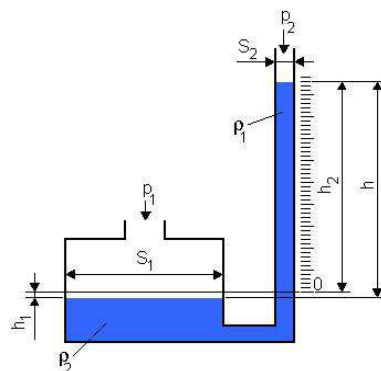
Nejobvyklejší délka trubice tlakoměru bývá zpravidla 300 až 500 mm, maximálně 2 m. Měřicí rozsah tlakoměru je dán hustotou použité tlakoměrné kapaliny. Určení výšky hladiny se provádí součtem výchylek na stupnici v obou ramenech U-trubice. Proto nemusí být kalibrovány. Obvykle jsou stupnice vyneseny v jednotkách délky nebo mohou být vyneseny v jednotkách tlaku [3].

Zapojením tlakoměru do série se zvětší rozsah měření. U-trubice zapojené do série se nazývají násobné nebo více-trubkové tlakoměry. Součtem všech výchylek dostaneme výsledný tlak podle vztahu [3]:

$$p = (h_1 + h_2 + h_3 + h_4) \cdot \rho \cdot g \quad [\text{Pa}] \quad (3.8)$$

3.3.2 Nádobkové tlakoměry

Konstrukce nádobkových tlakoměrů (Obr. 3.6) vychází z U-trubice. Jedno rameno tlakoměru je rozšířené do nádoby, ve které je pokles hladiny zcela nepatrný, protože má mnohem větší průměr než průměr trubice. Výchylka výšky vodního sloupce se odečítá pouze z trubice mající stálý průřez (musí být kalibrovaná) [6].



Obr. 3.6: Nádobkový tlakoměr [6]

Měřený tlakový rozdíl je možno vyjádřit z rovnice rovnosti objemu:

$$S_1 h_1 = S_2 h_2 \Rightarrow h_1 = h_2 \frac{S_2}{S_1} \quad [\text{m}] \quad (3.9)$$

$$\Delta p = p_2 - p_1 = (\rho_m - \rho)g(h_1 + h_2) = (\rho_m - \rho)gh_2 \left(1 + \frac{S_2}{S_1}\right) \quad [\text{Pa}] \quad (3.10)$$

kde h_2 je výška tlakoměrné kapaliny v trubici, ρ_m hustota tlakové kapaliny, g tíhové zrychlení, S_1 plocha (průřez) nádoby, S_2 plocha (průřez) trubice [6].

3.3.3 Kapalinové tlakoměry se šikmou trubicí

Tyto tlakoměry jsou přístroje, které se využívají k měření velmi malých tlaku. Konstrukce vychází z nádobkového tlakoměru, ale jeho rameno je nakloněno. Sklon trubice může být pevný nebo nastavitelný. Poměr pevného sklonu bývá obvykle v poměru 1:5. Prodloužení dráhy kapaliny se provede zešikmením trubice a tím se docílí přesnějšího odečítání. Pro přesnost měření v závislosti na sklonu trubice k vodorovné rovině jsou tlakoměry vybaveny vodováhou. Jako měřicí médium se pro tento tlakoměr používá výhradně líh z důvodů dobré čitelnosti i při malém úhlu ramena. Měřicí rozsah je dán délkou nakloněného ramena, které se zpravidla vyrábějí s délkou 200 až 600 mm [6].

3.4 Převodníky tlaku

Převodníky tlaku jsou přístroje sloužící k převádění měřeného tlaku na unifikovaný výstupní signál. Zde se používají čidla s elektrickým výstupem a následné zpracování signálu je charakterizováno použitím mikroprocesorů a miniaturních elektronických obvodů. Ty slouží pro ukládání důležitých údajů do paměti. Jde o údaje o měřicím rozsahu, kalibraci a nastavení mezních hodnot pro signalizaci [3].

Mikroprocesor umožní použitím SW dosáhnout zvýšení nejen přesnosti, ale i přizpůsobivosti (flexibility) a univerzálnosti přístroje.

Podle vyhodnocení elektrických veličin se převodníky dělí na:

- odporové
- indukční
- kapacitní
- rezonanční

Převodníky tlaku všech konstrukcí je možno použít na měření tlaku, absolutního tlaku i tlakové difference. Mohou být opatřeny displejem, tudíž se informace o měřeném tlaku mohou číst přímo v místě měření [3].

3.4.1 Odporové převodníky tlaku – tenzometry

Odporové převodníky tlaku tzv. tenzometry využívají deformace pro změnu elektrického odporu. Nejčastěji se tyto převodníky tlaku umísťují na deformační člen např. membránu [7].

Membrány bývají nejčastěji křemíkové, ve kterých jsou vytvořeny polovodičové tenzometry v difúzních vrstvách [3].

Přivedený tlak na membránu je přenášén na křemíkovou membránu s tenzometry. V závislosti na rozdílu tlaku se křemíková membrána s tenzometry vychyluje a tím dochází ke změně elektrického odporu. Změna elektrického odporu je zpracována na unifikovaný signál 4-20 mA. Odporové tenzometry se používají pro měřicí rozsah od 10 kPa až 50 MPa [7].

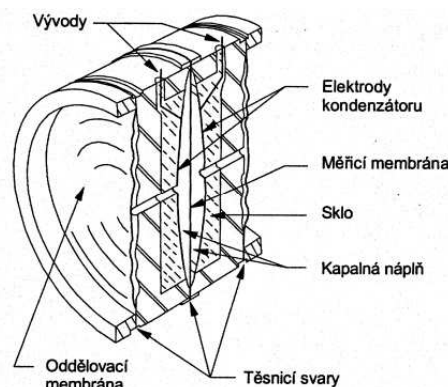
3.4.2 Indukční převodníky tlaku

Tyto převodníky využívají citlivé elastické snímače tvořené cívkou s jádrem, kde se mění indukčnost v závislosti na měřeném tlaku. Měřený tlak způsobuje výchylku snímače přenášející na jádro, které zapříčiní změnu výstupního signálu měřicího zesilovače [3].

3.4.3 Kapacitní převodníky tlaku

Tyto převodníky využívají kapacitní snímače. Měřicí člen těchto snímačů je membrána (Obr. 3.7). Může být kovová, polovodičová nebo keramická. Tvoří jednu elektrodu kapacitního snímače. Princip měření závisí na změně vzdálenosti mezi elektrodami [3].

Působící tlak média působí přímo na membránu a ta se jeho vlivem deformuje. Mechanická deformace zapříčiňuje úměrnou změnu elektrické kapacity. Změna elektrické kapacity je převedena na výstupní proporcionální výstupní signál, který má hodnotu 4-20 mA. Měřicí rozsah těchto převodníků je 100 Pa až 40 MPa [3].



Obr. 3.7: Průřez kapacitním snímačem [3]

4 Měření průtoku tekutin a charakteristika měřidel

Průtok je podíl množství tekutiny protékající průtočným průřezem potrubí a času potřebného k protečení tohoto množství tímto průřezem. Měření průtoku tekutin se provádí pomocí měřících zařízení, která využívají různé fyzikální principy a jde v podstatě o určování střední rychlosti proudění nebo určení objemu, popřípadě hmotnosti proteklé tekutiny v určitém čase. [3]

4.1 Objemová metoda měření průtoku tekutin

Tato metoda měření průtoku vychází z definice objemového průtoku Q_V nebo hmotnostního průtoku Q_m jako objemové množství tekutiny V nebo také hmotnostní množství tekutiny m , které proteče měřeným úsekem za určitý čas t [2].

Pro objemový průtok platí:

$$Q_V = \frac{V}{t} \quad [\text{m}^3\text{h}^{-1}] \quad (4.1)$$

Pro hmotnostní průtok platí:

$$Q_m = \frac{m}{t} = Q_V \cdot \rho = \frac{V}{t} \cdot \rho \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4.2)$$

V je protečený objem tekutiny, m je hmotnost protečené tekutiny, t je čas.

Průtokoměry využívající objemovou metodu měření průtoku se nazývají objemové průtokoměry. Princip měření těchto měřidel je postupné plnění a vyprazdňování prostoru měřidla. Tato činnost se může periodicky opakovat nebo může probíhat jednorázově [2].

4.2 Rychlostní metoda měření průtoku

Tato metoda měření vychází z průtoku, který je definován jako součin střední rychlosti proudění a průtočného průřezu.

Pro objemový průtok platí:

$$Q_V = v_s \cdot S \quad [\text{m}^3\text{s}^{-1}] \quad (4.3)$$

Pro hmotnostní průtok platí:

$$Q_m = Q_v \cdot \rho = v_s \cdot S \cdot \rho \quad [\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}] \quad (4.4)$$

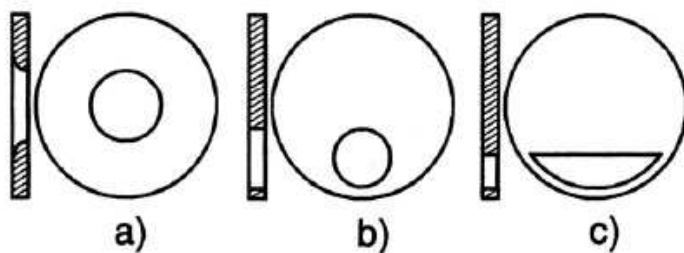
kde v_s je střední rychlost proudění, S je průtočný průřez a ρ je hustota měřené kapaliny.

Průtokoměry využívající rychlostní metodu měření se nazývají rychlostní průtokoměry. Rychlostní průtokoměry se dělí na průtokoměry s konstantním průtočným průřezem, které měří okamžitou rychlost proudění tekutiny (škrticí orgány, ultrazvukové, indukční, turbínové apod.) a na průtokoměry s konstantní střední rychlostí proudění mající proměnlivou průtočnou plochu (plováčkové průtokoměry – rotametry a jejich modifikace) [8].

4.2.1 Clony

Clony patří do skupiny škrticích orgánů a používají se k měření průtoku pomocí změřené tlakové difference clony, která je úměrná objemovému průtoku. Clony způsobují zmenšení průřezu potrubí vložением škrticího prvku kolmo ve směru proudění. Nejčastěji jsou vyráběny z nerezové oceli kde rozměry a jiné potřebné parametry jsou definovány normou ČSN 5167-2. Odběr tlaku je připojen v jisté vzdálenosti před clonou a za clonou, kde je minimální statický tlak a maximální rychlost.

Existují dva základní typy odběru a to koutové a přírubové. Mezi základní typy clon patří clona soustředná (normalizovaná), excentrická a segmentová (Obr. 4.1). [8]



Obr. 4.1: Provedení clon: a) soustředná, b) excentrická, c) segmentová [3]

4.2.2 Dýzy

Tyto průtokoměry jsou tvořeny tryskou, která je upevněná mezi dvěma přírubami, které mají hladký tvar náběhu a ostrým ukončením. Dýzy se zpravidla používají pro vysoké teploty (přehřáté páry) a pro proudění s vysokou rychlostí.

Dýzy jsou instalovány souose s potrubím, které může mít libovolnou pozici [8].

4.2.3 Venturiho trubice

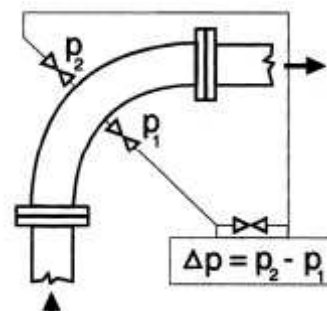
Tyto průtokoměry se vyrábějí pro potrubí do průměru až 1500mm. Venturiho trubice se skládá s poměrně dlouhého vstupního členu, který je sbíhavý a funguje jako škrtící orgán a difuzoru. V difuzoru klesá rychlost proudění tekutin a dochází ke zvýšení statického tlaku v souladu s Bernoulliho rovnicí. Odběr tlaku p_1 a p_2 u Venturiho trubice ústí do dutin prstencového tvaru. Tím se získává tlak podél prstence, který kompenzuje rychlostní profil [7].

Venturiho trubice je vhodná pro měření průtoku čistých, nekorodujících plynů a kapalin [7].

4.2.4 Kolenové průtokoměry

Tyto průtokoměry využívají kinetické energie proudící tekutiny. Síla působící na vnitřní stranu kolena při proudění je přímo úměrná součinu čtverci rychlosti proudění a hustoty kapaliny [8].

Kolenový průtokoměr může být každý úsek potrubí s úhlem 90° mající otvory pro připojení senzoru sloužící pro odběr tlaku.



Obr. 4.2: Kolenový průtokoměr [3]

Jedná se o velice jednoduché zařízení, vyžaduje ale použití velmi citlivých senzorů tlakové difference díky malému tlakovému rozdílu Δp (Obr 4.2).

Určení objemového průtoku se vypočítá z tlakové difference podle vztahu:

$$Q_v = C_k \cdot S \cdot \sqrt{\frac{R}{2d}} \cdot \sqrt{\frac{2g}{\rho} \cdot \Delta p} \quad [\text{m}^3 \text{s}^{-1}] \quad (4.5)$$

kde S je průtočná plocha potrubí, Δp je rozdíl tlaku mezi odběry na vnějším a vnitřním poloměru zakřivení, R je střední poloměr zakřivení, d je průměr potrubí a C_k je průtokový součinitel který závisí na poměru $\frac{R}{d}$ a úhlu zakřivení kolena [8].

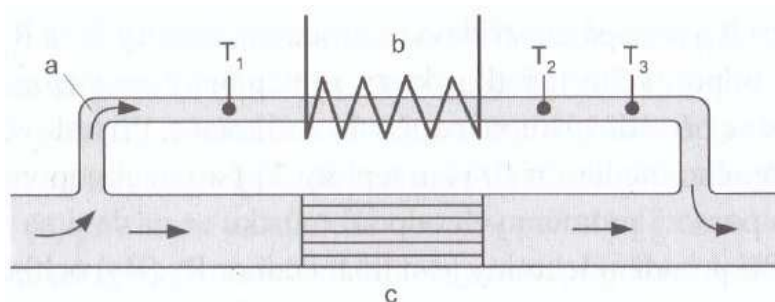
4.2.5 Tepelné průtokoměry

Jsou to hmotnostní průtokoměry využívající se v průmyslové praxi. Princip činnosti je založen na výměně tepla mezi zdrojem tepelné energie (tj. vyhřívaný člen) a okolím

(tj. proudící tekutina). Tepelné průtokoměry se dělí na dva typy podle způsobu vyhodnocování, termoanemometry a kalorimetrické průtokoměry [8].

Termoanemomter. Hlavním členem je odporový drátek (nejčastěji platinový) o průměru 0,01 až 0,1 mm žhavený na teplotu 200 až 500 °C. Množství tepla, která je odebírané proudící tekutinou, je přímo úměrné hmotnostnímu průtoku Q_m [8].

Kalorimetrická průtokoměr. Využívá oteplení měřené tekutiny. Tekutina proudí obtokem (tzv. bypass), který je tvořen kapilárou. Tekutina proudící kapilárou je snímána teplotními snímači, mezi nimiž je topné vinutí (Obr. 4.3) [8].



Obr. 4.3: Princip kalorimetrického průtokoměru a) obtok, b) topné vinutí, c) laminární člen, T_1 až T_3 teplotní snímače [8]

5 Experimentální měření

Úkolem bakalářské práce bylo měření a vyhodnocení ztrátového součinitele místních ztrát ζ při proudění vzduchu, kde měřenými prvky byly kanalizační kolena vyrobená z polypropylenu s úhly 45° , $67,5^\circ$ a $87,5^\circ$, na kterých dochází k místním ztrátám energie při proudění vzduchu vlivem změny geometrie.

Měření, bylo realizováno na experimentální měřicí trati, kde byla měřena tlaková ztráta kolena Δp , přetlak před průtokoměrem p_p a průtok vzduchu na konci vzduchové trati Q_N . Tyto hodnoty byly potřebné pro výpočet součinitele místních ztrát. Počítané hodnoty byly následně vyneseny do grafických závislostí. Experimentální měřicí trať byla sestavena v laboratoři mechaniky tekutin E 306.

5.1 Měření tlakové ztráty a tlaku před průtokoměrem

Jeden z parametrů pro výpočet součinitele místních ztrát je tlaková ztráta měřeného prvku. Byla měřena pomocí tlakové difference Δp (též tlaková ztráta). Prvky pro odběry statického tlaků byly zapojeny do měřicí tratě před měřený prvek a za měřený prvek v předepsané vzdálenosti. Ta je rovna minimálně desetinásobku světlosti měřeného prvku. Tlaková difference byla snímána pomocí tlakového převodníku ALMEMO FD8612DPSTYP DPS jehož výstupní signál byl vyhodnocován pomocí zařízení ALMEMO 2290-3 zobrazující tlakovou diferenci pomocí displeje v číselných hodnotách (Pa).

Další měřený parametr byl přetlak před průtokoměrem (p_p). Pro snímání tohoto tlaku byl použit druhý tlakový převodník. Signál tlakového převodníku byl vyhodnocován stejným vyhodnocovacím zařízením jako v případě měření tlakových ztrát.

5.2 Měření průtoku vzduchu

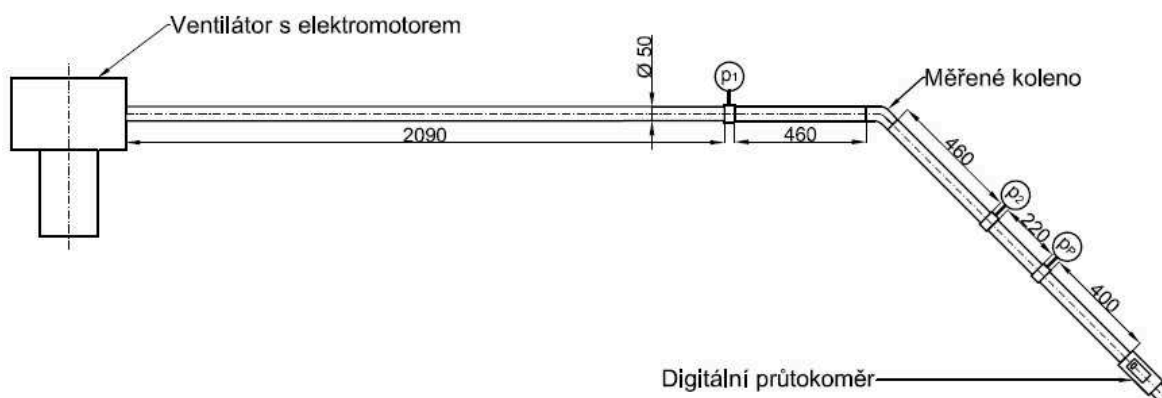
Měření průtoku vzduchu bylo realizováno digitálním průtokoměrem ifm electronic SD9000, který byl umístěn na konci experimentální měřicí tratě. Tento typ průtokoměru měří hodnotu objemového průtoku při normálních podmínkách.

6 Návrh experimentální měřicí tratě

Každá měřicí trať se skládala z několika prvků a byla sestavena tak, aby odpovídala potřebám měření. Na začátku každé měřicí tratě byl ventilátor, který byl poháněn elektromotorem řízený frekvenčním měničem, lišily se pouze vloženým měřeným prvkem. Ten byl v určité vzdálenosti umístěn mezi odběry statického tlaku. Na konci měřicí tratě byl umístěn digitální průtokoměr.

6.1 Měřicí trať pro koleno 45°

Experimentální měřicí trať pro měření tlakových ztrát kolene 45° byla sestavena v laboratoři E306. Na již připevněný ventilátor (Obr. 7.2) byla na výstup připojena trubka z polypropylenu o délce 2090 mm a světlosti 46 mm. Na konec byl usazen kroužek (Obr. 7.10) sloužící pro odběr statického tlaku (p_1). Za kroužkem pro odběr statického tlaku následovala přímá trubka o délce 460 mm stejné světlosti. Poté bylo připojeno měřené koleno 45° (Obr. 7.7), za které byla připojena další přímá plastová trubka o délce 460 mm. Na konec této trubky byl umístěn druhý kroužek sloužící pro odběr statického tlaku (p_2). Z obou kroužků odběru statického tlaku (p_1 a p_2) byly vyvedeny silikonové hadičky, které sloužily jako přívod tlakového signálu do digitálního převodníku tlaku (snímač diferenčního tlaku) (Obr. 7.3). Trubka připevněná na druhý kroužek měla délku 220 mm. Na její konec byl instalován kroužek sloužící pro odběr tlaku (p_p) před průtokoměrem. Poslední trubka spojovala kroužek odběru statického tlaku a digitálního průtokoměru (Obr. 7.5) ve vzdálenosti 400 mm. Takto sestavená trať (Obr. 6.1) byla připravená k měření potřebných veličin.



Obr. 6.1: Schéma experimentální měřicí tratě pro koleno 45°

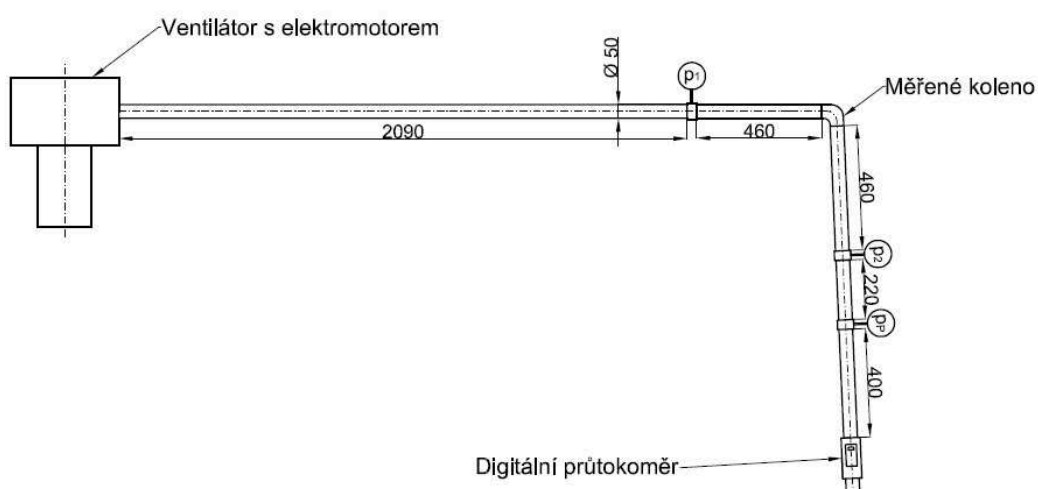
Fyzické zapojení experimentální měřicí tratě pro koleno $67,5^\circ$ je zobrazeno na Obr. 6.5.



Obr. 6.5: Sestava experimentální měřicí tratě pro koleno $67,5^\circ$

6.3 Měřicí trať pro koleno $87,5^\circ$

U experimentální tratě pro koleno $87,5^\circ$ stejně jako v předchozím případě došlo pouze k záměně měřeného kolena (viz. Obr. 6.6).



Obr. 6.6: Schéma experimentální měřicí tratě pro koleno $87,5^\circ$

Fyzické zapojení experimentální měřicí tratě pro koleno $67,5^\circ$ je zobrazeno na Obr. 6.5.



Obr. 6.7: Sestava experimentální měřicí tratě pro koleno $87,5^\circ$

7 Specifikace prvků a měřidel

V této kapitole budou specifikovány prvky a měřidla, které byly aplikovány praktické části této bakalářské práce.

Pro sestavení experimentální měřicí tratě byly použity tyto prvky a měřidla:

- Frekvenční měnič
- Ventilátor s elektromotorem
- Digitální převodník tlaku
- Vyhodnocovací zařízení
- Digitální průtokoměr
- Plastová potrubí různých délek
- Plastová kolena různých úhlů (tj. 45°, 67,5° a 87,5°)
- Kroužky pro odběr statického tlaku

Frekvenční měnič

Typ:	Combivert F5-B (Basic)
Výrobce:	Karl E. Brinkmann GmbH
Výkon:	0,75 kW
Napájení:	3 x 400 V



Obr. 7.1: Frekvenční měnič [9]

Ventilátor s elektromotorem

Typ:	HRD 1 TFU-105Hz/0,75
Výrobce:	Energoekonom, spol. s.r.o.
Maximální Průtok:	11 m ³ ·min ⁻¹
Maximální otáčky:	6200 min ⁻¹
Frekvence:	105 Hz
Napětí:	3 x 400 V
Výkon elektromotoru:	0,9 kW



Obr. 7.2: Ventilátor s elektromotorem [9]

Digitální převodník tlaku

Typ:	Almemo FD8612DPS
Výrobce:	AHLBOR GmbH
Měřicí rozsah:	$0 \div 2500 \text{ Pa}$
Výstup:	analogový ($0 \div 10 \text{ V}$)
Napájecí napětí:	6 V
Přesnost:	$\pm 1 \%$



Obr. 7.3: Digitální převodník tlaku [9]

Vyhodnocovací zařízení

Typ:	Almemo 2290-3
Výrobce:	AHLBOR GmbH
Napájení:	9 V
Vstup:	2 analogové vstupy
Výstup:	2 analogové výstupy



Obr. 7.4: Vyhodnocovací zařízení [9]

Digitální průtokoměr

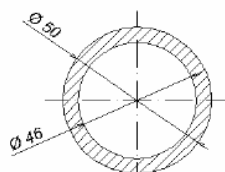
Typ:	SD9000
Výrobce:	ifm electronic
Rozsah průtoku:	$0 \div 8200 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$
Přesnost:	$\pm 3 \%$



Obr. 7.5: Digitální průtokoměr [10]

Potrubí

Materiál: Plast



Obr. 7.6: Plastové potrubí [9]

Koleno HTB DN50 - 45°

Materiál: PP

Úhel: 45°

Světlost: 46 mm



Obr. 7.7: Koleno 45° [11]

Koleno HTB DN50 - 67,5°

Materiál: PP

Úhel: 67,5°

Světlost: 46 mm



Obr. 7.8: Koleno 67,5° [11]

Koleno HTB DN50 - 87,5°

Materiál: PP

Úhel: 87,5°

Světlost: 46 mm



Obr 7.9: Koleno 87,5° [11]

Kroužek pro odběr statického tlaku

Výrobce: VŠB

Materiál: Plast

Světlost: 50 mm



Obr. 7.10: Kroužek pro odběr statického tlaku

8 Postup měření

V této kapitole bakalářské práce bude popsán postup měření u měřených prvků za účelem získání hodnot pro stanovení součinitele místních ztrát.

8.1 Postup měření na trati pro koleno 45°

Na sestavené trati (Obr. 6.1) bylo zkontrolováno, jestli je vše pevně spojeno a nedochází k úniku proudícího vzduchu skrz netěsnosti ve spojích. Poté byly zapojeny všechny elektrické komponenty tratě do zdroje. Frekvenční měnič (Obr. 7.1), který ovládal otáčky elektromotoru ventilátoru, byl pomocí příslušného tlačítka nastaven na hodnotu 25 Hz. Tím bylo docíleno roztočení ventilátoru a do měřicí tratě začal proudit vzduch o určitém průtoku. Tento průtok byl po ustálení přímo úměrný nastavené frekvenci (tj. $Q_N=53 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$). Hodnota objemového průtoku byla zobrazována přímo na displeji průtokoměru, který byl připojen na konci této tratě (hodnota průtoku odpovídala normálním podmínkám). Hodnota byla následně zapsána do již předem připravených tabulek. Z displeje vyhodnocovacího zařízení ALMEMO (Obr. 7.4) se současně odečetla tlaková ztráta Δp . Tato hodnota byla snímána pomocí kroužků pro odběr statického tlaku p_1 a p_2 umístěných před a za měřeným kolenem. Nabývala hodnoty $\Delta p=10 \text{ Pa}$. Na stejném zařízení se přepnul režim snímaného tlaku a odečetl se přetlak p_p před průtokoměrem, kdy tento přetlak dosáhl hodnoty $p_p=61 \text{ Pa}$. V tuto chvíli byly všechny potřebné parametry pro frekvenci 25 Hz zaznamenány a bylo možné pokračovat v dalším měření.

Na frekvenčním měniči bylo nastaveno 30 Hz, po ustálení proudění byly zaznamenány stejné hodnoty jako v předešlém případě (tj. Objemový průtok Q_N , tlaková ztráta Δp a přetlak před průtokoměrem p_p). Tento způsob měření byl opakován vždy se zvýšením frekvence o 5 Hz až do 100 Hz.

8.2 Postup měření na trati pro koleno 67,5° a 87,5°

Postup měření, na trati sestavené pro kolena s úhlem 67,5° (Obr. 6.4) a 87,5° (Obr. 6.6) se od měření na trati s kolenem 45° (Obr. 6.1) nijak nelišil. Získávaly se totožné hodnoty pomocí stejného postupu.

9 Definice vztahů a výpočtů

Tato kapitola je zaměřena na popis vztahů a výpočtů potřebných pro výpočet ztrátového součinitele ζ , což je hlavním cílem této bakalářské práce.

9.1 Popis vztahů

Tlaková ztráta Δp [Pa] byla vyhodnocená zařízením ALMEMO 2290-3.

$$\Delta p = p_1 - p_2 \quad (9.1)$$

p_1 – přetlak změřený před měřeným prvkem [Pa]

p_2 – přetlak změřený za měřeným prvkem [Pa]

Objemový průtok Q_V [$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$] byl vypočten na základě změřeného objemového průtoku při normálních podmínkách podle vztahu:

$$Q_V = Q_N \cdot \frac{p_N}{p} \cdot \frac{T}{T_N} \quad (9.2)$$

kde

$$p = p_N + p_P \quad (9.3)$$

Q_N – objemový průtok při normálních podmínkách [$\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$]

T_N – tzv. normální teplota 288,15 [K]

T – teplota okolního vzduchu 298,15 [K]

p_N – atmosférický tlak 101 325 [Pa]

p_P – přetlak měřený před průtokoměrem [Pa]

Střední rychlost proudění v_s [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$] se určila ze vztahu:

$$v_s = \frac{Q_V}{S} = \frac{4 \cdot Q_V}{\pi \cdot d^2} \quad (9.4)$$

d – vnitřní průměr potrubí 0,046 [m]

Reynoldsovo číslo Re [1] bylo určeno vztahem:

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\nu} \quad (9.5)$$

ν – kinematická viskozita vzduchu při teplotě 20°C $15,56 \cdot 10^{-6} \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$

Ztrátový součinitel ζ [1] byl stanoven následujícím vztahem:

$$\zeta = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot v_s^2} \quad (9.6)$$

ρ – hustota vzduchu při teplotě 20°C $1,205 \text{ [kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{]}$

9.2 Příklad výpočtů

Příklad výpočtů je uveden pro první řádek Tab. 9.1. Kolena 45° (trať Obr. 6.1).

Objemový průtok:

$$Q_V = Q_N \cdot \frac{p_N}{p} \cdot \frac{T}{T_N} = \frac{53}{3600} \cdot \frac{101325}{101325 + 61} \cdot \frac{293,15}{288,15} = 0,0150 \text{ [m}^3 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

Střední rychlost proudění:

$$v_s = \frac{Q_V}{S} = \frac{4 \cdot Q_V}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,0150}{\pi \cdot 0,046^2} = 9,0069 \text{ [m} \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$$

Reynoldsovo číslo:

$$Re = \frac{v_s \cdot d}{\nu} = \frac{9,0069 \cdot 0,046}{15,56 \cdot 10^{-6}} = 26\,627,2282 \text{ [1]}$$

Ztrátový součinitel:

$$\zeta = \frac{2 \cdot \Delta p}{\rho \cdot v_s^2} = \frac{2 \cdot 10}{1,205 \cdot 9,0069^2} = 0,2046 [1]$$

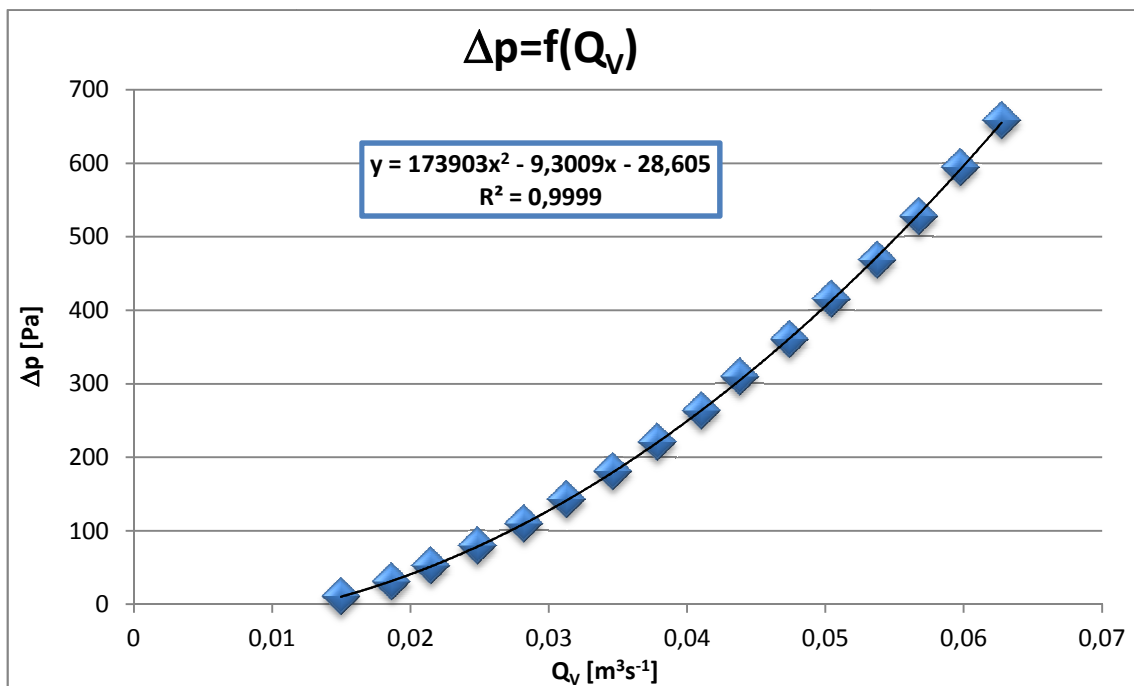
9.2.1 Vyhodnocení měření pro koleno 45°

Naměřené a vypočtené hodnoty pro koleno 45° jsou uvedeny v Tab. 9.1.

Tab. 9.1: Naměřené a vypočtené hodnoty pro koleno 45°

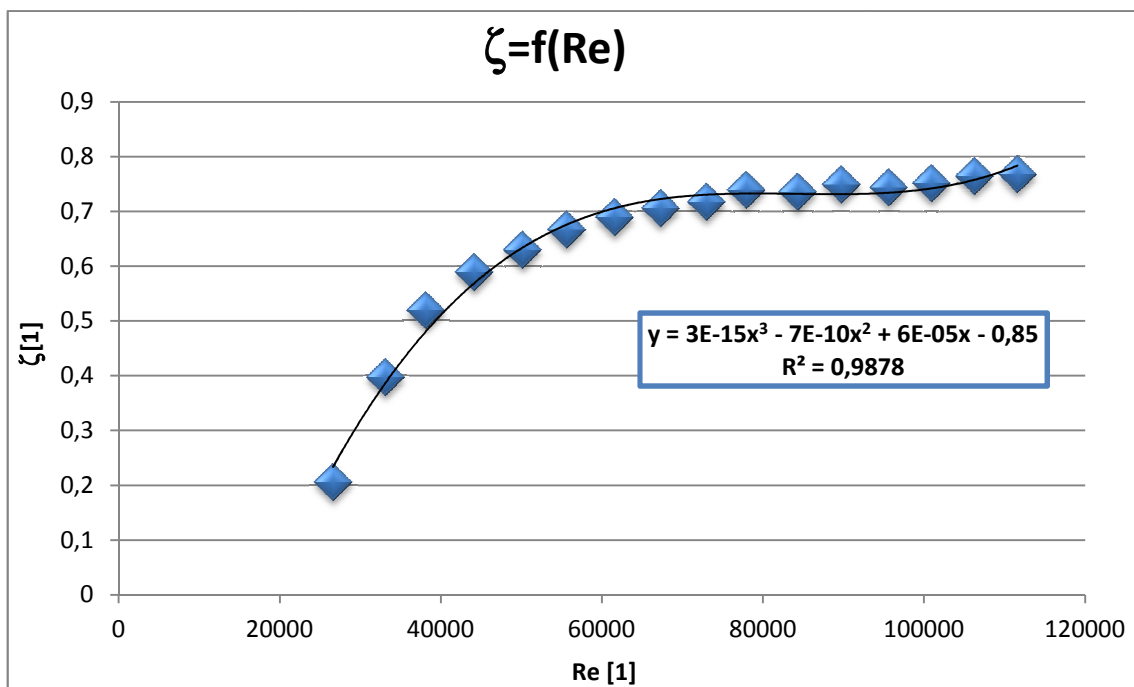
	Naměřené hodnoty				Vypočtené hodnoty			
č. měření	Hz	Q _N	Δp	p _p	Q _v	v _s	Re	ζ
	[Hz]	[m ³ h ⁻¹]	[Pa]	[Pa]	[m ³ s ⁻¹]	[ms ⁻¹]	[1]	[1]
1.	25	53	10	61	0,0150	9,0069	26 627,2282	0,2046
2.	30	66	30	99	0,0186	11,2120	33 146,0119	0,3961
3.	35	76	52	142	0,0214	12,9053	38 151,9599	0,5182
4.	40	88	79	193	0,0248	14,9355	44 153,7607	0,5878
5.	45	100	109	250	0,0282	16,9626	50 146,5719	0,6288
6.	50	111	142	316,5	0,0313	18,8162	55 626,2769	0,6657
7.	55	123	180	390	0,0346	20,8353	61 595,3870	0,6882
8.	60	134,5	220	468	0,0378	22,7659	67 302,6944	0,7045
9.	65	146	263	558	0,0410	24,6906	72 992,6636	0,7160
10.	70	156	309	648	0,0438	26,3584	77 923,3263	0,7382
11.	75	169	360	750	0,0474	28,5264	84 332,5819	0,7343
12.	80	180	415	862	0,0504	30,3499	89 723,2376	0,7478
13.	85	192	468	974	0,0537	32,3377	95 600,0063	0,7428
14.	90	203	527	1 105	0,0567	34,1467	100 947,8203	0,7502
15.	95	214	594	1 236	0,0597	35,9510	106 281,9728	0,7628
16.	100	225	658	1 368	0,0627	37,7504	111 601,4295	0,7663

Z vypočtených hodnot (Tab. 9.1) byly sestaveny grafické závislosti. Závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku ($\Delta p = f(Q_v)$) je znázorněna v Graf 9.1 a závislost součinitele místních ztrát na Reynoldsovém čísle ($\zeta = f(Re)$) je znázorněna v Graf 9.2.



Graf 9.1: Závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku pro koleno 45°

Graf 9.1 znázorňuje závislost tlakového spádu Δp na objemovém průtoku vzduchu Q_v pro koleno 45° (Obr. 7.7). Z grafu je viditelné, že s narůstajícím objemovým průtokem Q_v nabývajících hodnot $Q_v = (0,0150 \div 0,0627) \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ roste tlaková ztráta Δp , která je v rozmezí hodnot $\Delta p = (10 \div 658) \text{ Pa}$. Je zřejmé, že závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku má polynomický průběh.



Graf 9.2: Závislost součinitele místních ztrát na Reynoldsově čísle pro koleno 45°

Graf 9.2 zobrazuje závislost součinitele místních ζ ztrát na Reynoldsově čísle pro změřené koleno 45° (Obr. 7.7). Součinitel místních ztrát měřeného kolena dosahuje hodnot

$\zeta=(0,2046\div 0,7663)$ a Reynoldsovo číslo má rozsah $Re=(26\,627,2282\div 111\,601,4295)$. Z grafu je patrné, že součinitel místní ztráty narůstá společně s rostoucím Reynoldsovým číslem do hodnoty přibližně $Re=62\,000$, kdy dosahuje hodnoty přibližně $\zeta=0,7$. Od těchto hodnot se součinitel místních ztrát mění nepatrně, i když Re stále narůstá.

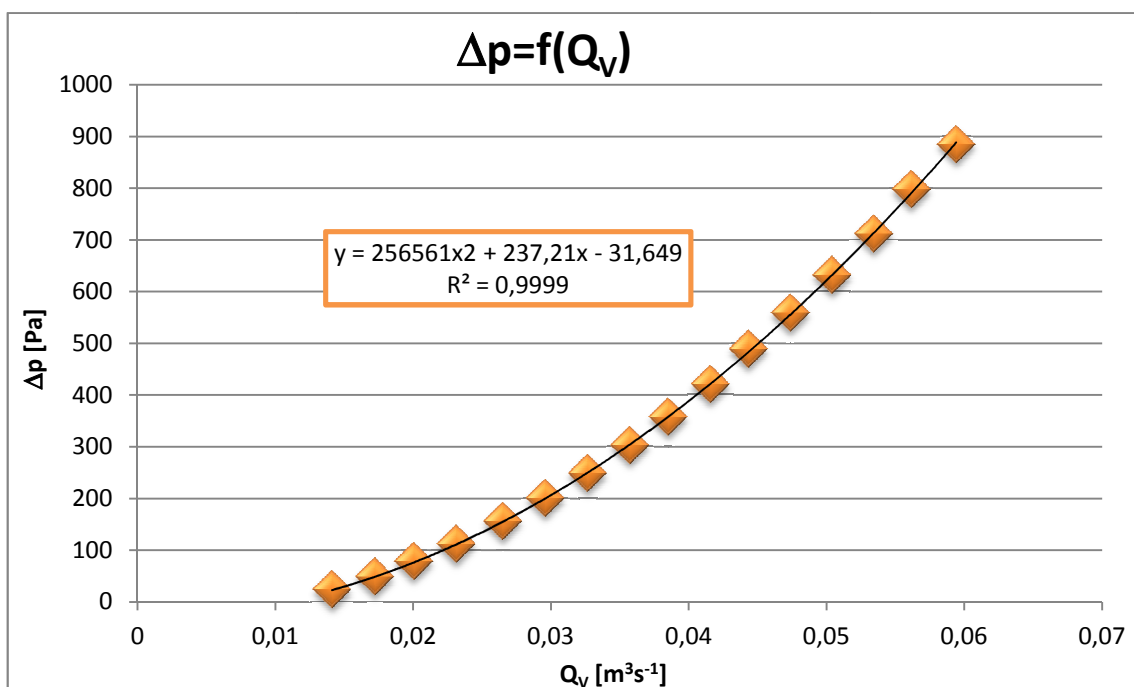
9.2.2 Vyhodnocení měření pro koleno 67,5°

Naměřené a vypočtené hodnoty pro koleno 67,5° jsou uvedeny v Tab. 9.2.

Tab. 9.2: Naměřené a vypočtené hodnoty pro koleno 67,5°

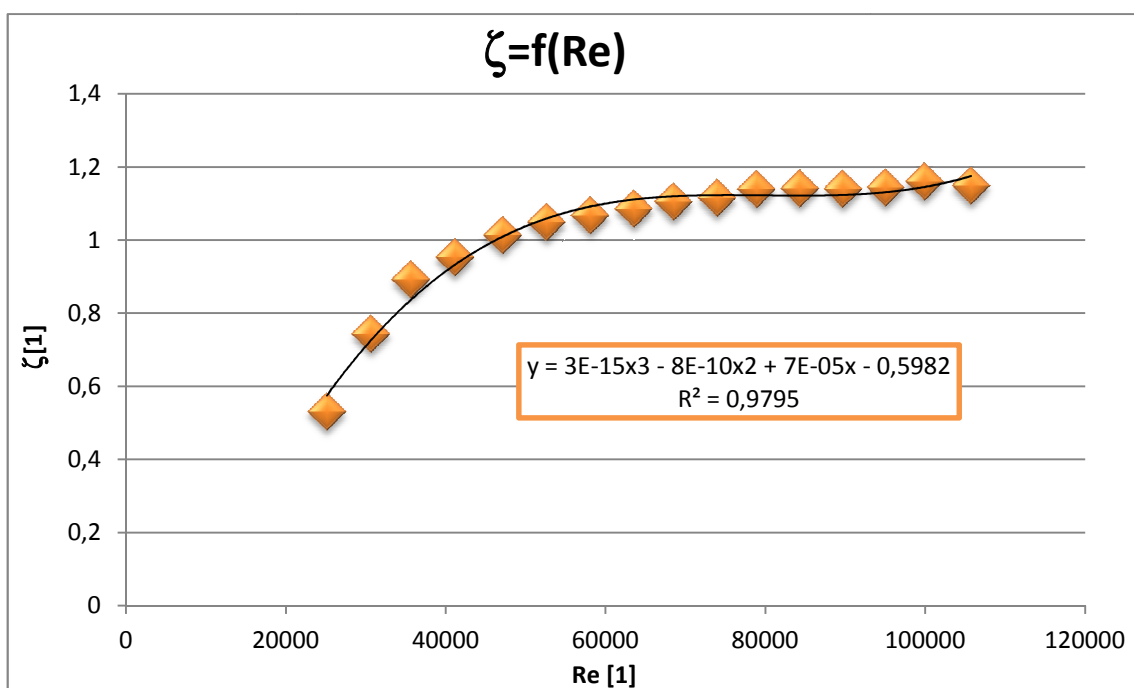
	Naměřené hodnoty				Vypočtené hodnoty			
č. měření	Hz	Q_N	Δp	p_p	Q_v	v_s	Re	ζ
	[Hz]	[m ³ h ⁻¹]	[Pa]	[Pa]	[m ³ s ⁻¹]	[ms ⁻¹]	[1]	[1]
1.	25	50	23	56	0,0141	8,4975	25 121,2655	0,5287
2.	30	61	48	92	0,0172	10,3633	30 637,0649	0,7418
3.	35	71	78	135	0,0200	12,0571	35 644,4216	0,8905
4.	40	82	111	182	0,0231	13,9187	41 147,7356	0,9510
5.	45	94	155	240	0,0265	15,9464	47 142,4188	1,0117
6.	50	105	200	301	0,0296	17,8018	52 627,4767	1,0475
7.	55	116	248	367	0,0327	19,6540	58 103,0969	1,0656
8.	60	127	302	444	0,0357	21,5015	63 564,7429	1,0842
9.	65	137	357	523	0,0385	23,1765	68 516,6534	1,1031
10.	70	148	420	615	0,0416	25,0148	73 951,1900	1,1140
11.	75	158	488	711	0,0443	26,6799	78 873,6143	1,1379
12.	80	169	558	815	0,0474	28,5083	84 278,9142	1,1396
13.	85	180	631	925	0,0504	30,3312	89 667,9558	1,1384
14.	90	191	711	1 038	0,0534	32,1492	95 042,6293	1,1418
15.	95	201	797	1 166	0,0562	33,7902	99 893,7708	1,1586
16.	100	213	884	1 305	0,0594	35,7590	105 714,2067	1,1474

V Tab. 9.2 jsou uvedeny naměřené a vypočtené hodnoty pro koleno 67,5° (Obr. 7.8). Z vypočtených hodnot (Tab. 9.2) byly sestaveny grafické závislosti totožným způsobem jako v předešlém případě (kapitola 9.2.1).



Graf 9.3: Závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku pro koleno 67,5°

Graf 9.3 znázorňuje průběh tlakové ztráty Δp , která nabývá hodnot $\Delta p = (23 \div 884)$ Pa při objemovém průtoku $Q_v = (0,0149 \div 0,0594) \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Tento průběh se viditelně neliší od průběhu pro koleno 45° (Graf 9.1).



Graf 9.4: Závislost součinitele místních ztrát na Reynoldsově čísle pro koleno 67,5°

Graf 9.4 zobrazuje závislost součinitele místních ztrát ζ pro koleno 67,5° (Obr. 7.8) na Reynoldsově čísle Re . Součinitel místních ztrát má rozsah $\zeta = (0,5287 \div 1,1474)$, Reynoldsovo číslo má rozpětí hodnot $Re = (25\,121,2655 \div 105\,714,2067)$.

Stejně jako v předchozím případě (Graf 9.2) se ztrátový součinitel mění nepatrně a to od hodnoty přibližně $\zeta=1,07$ při $Re=59\,000$.

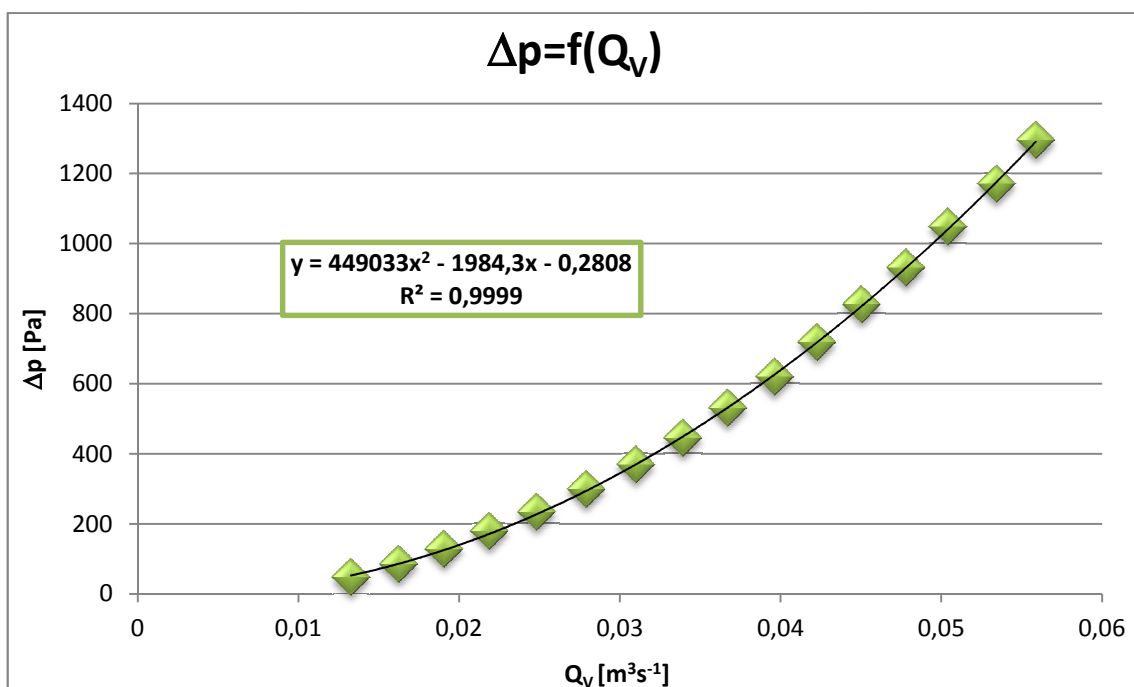
9.2.3 Vyhodnocení měření pro koleno 87,5°

Naměřené a vypočtené hodnoty pro koleno 87,5° jsou uvedeny v Tab. 9.3.

Tab. 9.3: Naměřené a vypočtené hodnoty pro koleno 87,5°

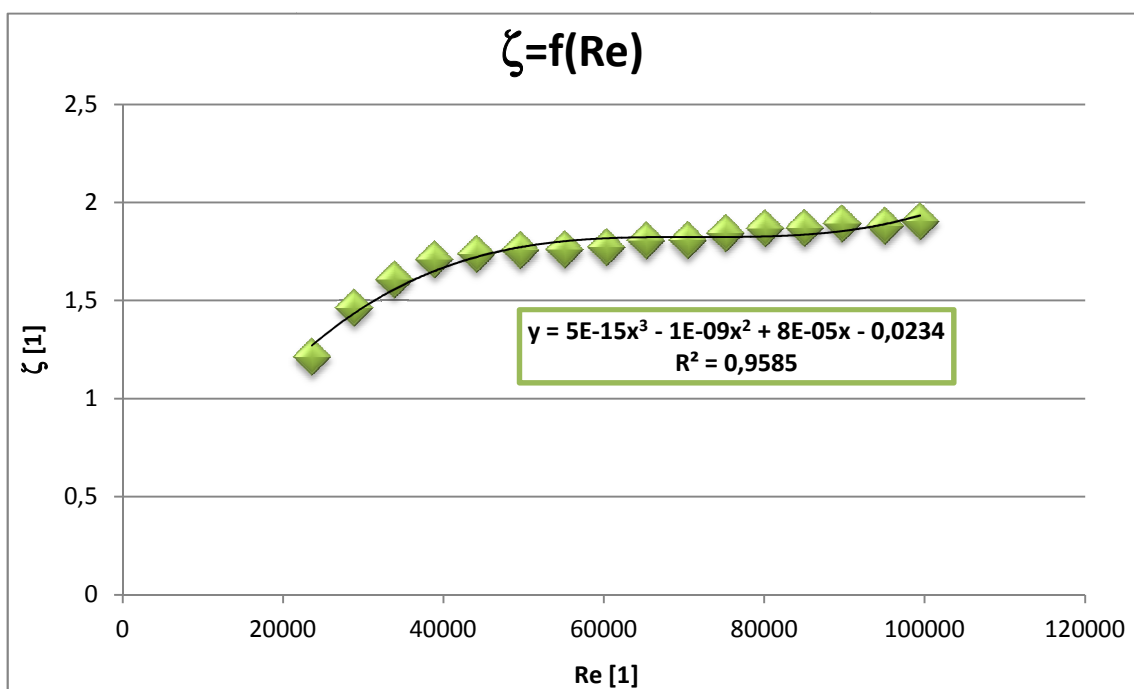
č. měření	Naměřené hodnoty				Vypočtené hodnoty			
	Hz	Q_N	Δp	p_p	Q_v	v_s	Re	ζ
	[Hz]	[m ³ h ⁻¹]	[Pa]	[Pa]	[m ³ s ⁻¹]	[ms ⁻¹]	[1]	[1]
1.	25	47	46,5	49	0,0133	7,9882	23 615,6202	1,2095
2.	30	57,5	84	81	0,0162	9,7698	28 882,3331	1,4607
3.	35	67,5	127	118	0,0191	11,4647	33 892,9811	1,6037
4.	40	77,5	178	161	0,0219	13,1576	38 897,6754	1,7065
5.	45	88	233	209	0,0248	14,9331	44 146,8028	1,7342
6.	50	99	298	264	0,0279	16,7907	49 638,2646	1,7544
7.	55	110	368	325	0,0310	18,6451	55 120,5297	1,7570
8.	60	120,5	444	391	0,0339	20,4116	60 342,8550	1,7688
9.	65	130,5	530	465	0,0367	22,0895	65 303,0518	1,8028
10.	70	141	618	544	0,0396	23,8483	70 502,6028	1,8035
11.	75	150,5	717	631	0,0423	25,4333	75 188,5642	1,8397
12.	80	160,5	825	728	0,0450	27,0975	80 108,2679	1,8648
13.	85	170,5	930	820	0,0478	28,7599	85 022,7898	1,8662
14.	90	180	1 047	924	0,0504	30,3315	89 668,8327	1,8889
15.	95	191	1 169	1 035	0,0534	32,1501	95 045,4148	1,8771
16.	100	200	1 295	1 152	0,0559	33,6266	99 410,3661	1,9008

V Tab. 9.3 jsou uvedeny naměřené a vypočtené hodnoty pro koleno 87,5° (Obr. 7.9). Z vypočtených hodnot (Tab. 9.3) byly sestaveny grafické závislosti totožným způsobem jako v předchozích případech (kapitola 9.2.1 a kapitola 9.2.2).



Graf 9.5: Závislost tlakové ztráty na objemovém průtoku pro koleno 87,5°

Graf 9.5 zobrazuje závislost ztrátové výšky Δp naměřené na kolenu 87,5° (Obr. 7.9) na objemovém průtoku vzduchu Q_v . S nárůstem objemového průtoku $Q_v = (0,0133 \div 0,0559) \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ je tlaková ztráta v rozmezí hodnot $\Delta p = (46,5 \div 1295) \text{ Pa}$.



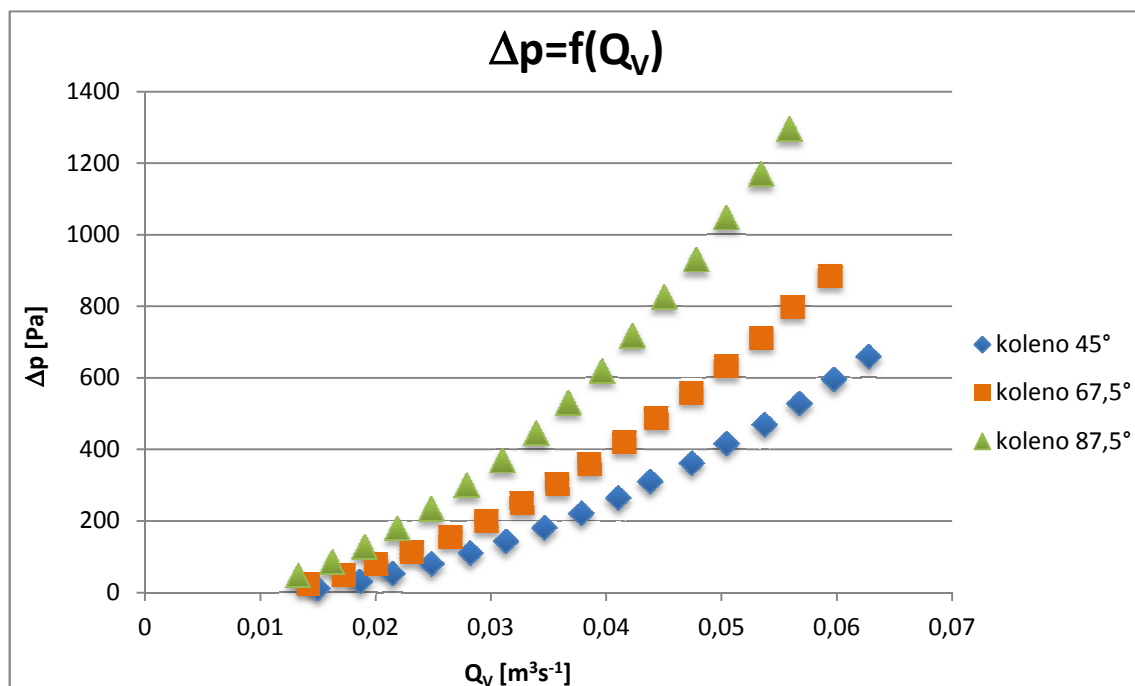
Graf 9.6: Závislost součinitele místních ztrát na Reynoldsově čísle pro koleno 87,5°

Graf 9.6 znázorňuje závislost součinitele místních ztrát ζ na Reynoldsově čísle Re pro koleno 87,5° (Obr. 7.9). Součinitel místních ztrát je v rozmezí hodnot $\zeta = (1,2095 \div 1,9008)$. Reynoldsovo číslo má rozsah $Re = (23\,615,6202 \div 99\,410,3661)$. Z grafu je patrné, že součinitel místní ztráty narůstá společně s rostoucím Reynoldsovým číslem do hodnoty

přibližně $Re=60\,000$, kdy dosahuje hodnoty přibližně $\zeta=1,7$. Od těchto hodnot se součinitel místních ztrát mění nepatrně, i když Re stále narůstá.

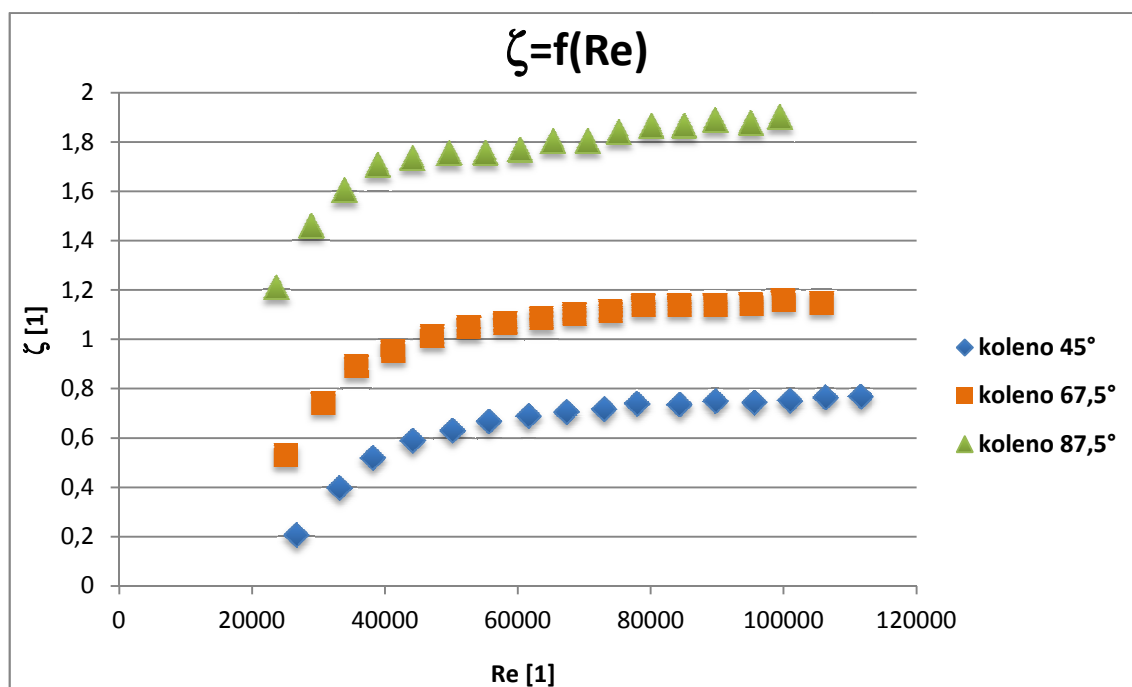
9.2.4 Porovnání výsledků místních ztrát (kolena)

Bylo provedeno porovnání výsledků všech měřených kolena. A to v závislostech tlakové ztráty Δp na objemovém průtoku Q_v a součinitele místních ztrát ζ na Reynoldsově číslu Re .



Graf 9.7: Porovnání všech kolena v závislosti tlakové ztráty na objemovém průtoku

V Graf 9.7 jsou porovnány všechna změřená kolena z hlediska závislosti tlakové ztráty Δp na objemovém průtoku Q_v . Je zřejmé, že nejmenší tlakovou ztrátu při proudění vzduchu má změřené koleno 45°. Tlaková ztráta změřeného kolena 67,5° je o téměř 35% větší, než tlaková ztráta u kolena 45°. U posledního změřeného kolena 87,5° je tlaková ztráta největší. Při porovnání s tlakovou ztrátou prvního změřeného kolena dosahuje tato ztráta téměř dvojnásobných hodnot. Z grafu je patrné, že tlaková ztráta je ovlivněna úhlem měřeného kolena. Čím větší je úhel kolena, tím větší je ztráta Δp .



Graf 9.8: Porovnání všech kolen v závislosti součinitele místních ztrát na Reynoldsově čísle

V Graf 9.8 jsou porovnány závislosti ztrátového součinitele ζ na Reynoldsově čísle Re pro všechna změřená kolena. Nejnižších hodnot součinitele místních ztrát je dosaženo u prvního změřeného kolena 45° . Hodnoty součinitele místních ztrát druhého změřeného kolena $67,5^\circ$ jsou takřka o 50% vyšší než hodnoty prvního kolena 45° . U posledního změřeného kolena $87,5^\circ$ jsou tyto hodnoty téměř o 150% vyšší v porovnání s prvním změřeným kolenem 45° . Z toho vyplývá, že čím větší je úhel změřeného kolena, tím větší je hodnota součinitele místních ztrát.

Součinitel místních ztrát u změřených kolen je závislý na Reynoldsově čísle pouze do určité hodnoty. Tato hodnota se pohybuje všech změřených kolen okolo $Re=60\,000$. Poté se součinitel místních ztrát mění nepatrně. Úhly měřených kolen ovlivňují pouze velikost součinitele místních ztrát, jejich grafické průběhy jsou však totožné.

10 Závěr

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo vyhodnocení součinitele místních ztrát kolen s různými úhly na vzduchové trati. Měření těchto prvků bylo uskutečněno na experimentálních měřicích tratích, které byly sestaveny v laboratoři E 306.

První část této bakalářské práce je zaměřena na teoretickou stránku této problematiky. Popisuje dva základní druhy ztrát: třecí a místní. Dále je definován tlak, jeho měření a charakteristiky vybraných měřidel tlaku. Další část je věnována průtoku, jeho měření a popisu základních měřidel průtoku. Tato teoretická část bakalářské práce je nezbytná z hlediska praktické části této práce.

Praktická část bakalářské práce se zabývá vyhodnocením součinitele místních ztrát na základě experimentálního měření. V první řadě byly zvoleny měřené prvky (koleno 45° , $67,5^\circ$ a $87,5^\circ$) a měřidla, které byly následně aplikovány v experimentálních měřicích tratích. Samotnému sestavení jednotlivých měřicích tratí předcházely jejich návrhy s ohledem na požadavky a charakter jednotlivých měření. Na základě těchto návrhů byly sestaveny tři měřicí tratě, které se lišily vloženým měřeným prvkem. Jako zdroj tlakového vzduchu byl použit ventilátor poháněný elektromotorem (Obr. 7.2). Ovládání otáček elektromotoru bylo realizováno frekvenčním měničem (Obr. 7.1) v rozsahu $25 \div 100$ Hz. Dále trať obsahovala potrubí světlosti 46 mm (Obr. 7.6). Byly použity tři kroužky pro odběr statického tlaku (Obr. 7.10). Ke snímání měřených tlaků byly použity dva digitální převodníky tlaku (Obr. 7.3) s vyhodnocovacím zařízením Almemo (Obr. 7.4). K měření průtočného množství vzduchu byl použit digitální průtokoměr SD9000 (Obr. 7.5).

Následně byly definovány výpočetní vztahy. Změřené a vypočtené hodnoty byly zaznamenány do tabulek, ze kterých byly vypracovány závislosti ($\Delta p = f(Q_v)$ a $\zeta = f(Re)$) pro jednotlivá kolena, které byly vyhodnoceny a vzájemně porovnány. Z těchto závislostí bylo zjištěno, že tlaková ztráta je závislá na množství protečeného vzduchu (Graf 9.7). Při stejné nastavené max. frekvenci měniče, ventilátor dodával menší průtočné množství pro koleno s úhlem 87° než pro koleno s úhlem 45° což je dáno větší tlakovou ztrátou na prvku. Tento závěr souvisí s tím, že ventilátor již nebyl schopen dosáhnout stejného průtoku jako v případě umístění kolene s úhlem 45° při stejných otáčkách ventilátoru. Z hlediska součinitele místních ztrát bylo zjištěno, že tento součinitel je větší, čím větší je úhel měřeného kolene, ovšem grafický průběh je u všech kolen totožný (Graf 9.8). Také je závislý na Reynoldsově čísle pouze do určité hodnoty, do které má součinitel místních ztrát rostoucí charakter. Od vyšších hodnot Re je součinitel ζ téměř konstantní (Graf 9.8).

11 Použitá literatura

- [1] NOSKIEVIČ, Jaromír, a kol. *Mechanika tekutin*. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1987. 354 s. ISBN 04-233-87
- [2] JENČÍK, Josef. – KUHN, Ludvík. *Technická měření ve strojnictví*. 1. vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1982. 580 s. ISBN 04-223-82
- [3] MIKAN, Jaroslav. *Měření plynu*. 1. Vyd. Říčany u Prahy: GAS s.r.o., 2003. 351 s. ISBN80-7328-053-1
- [4] ŠÍNDELÁŘ, Václav. – SYNÁČ, Jaroslav. *Základy metrologie – tlak, jeho měření a jednotky*. 1. vyd. Praha: Vydavatelství Úřadu pro normalizaci a měření, 1988. 199 s. ISBN 59-100-86
- [5] Deformační tlakoměry. *e-automatizace*. [online]. 14.12.2009 [cit. 2013-12-14]. Dostupné z: http://www.e-automatizace.cz/ebooks/mmv/tlak/tlak_deformacni_tlakomery.htm
- [6] DRÁBKOVÁ, S. a kol. *Mechanika tekutin – učební text*. VŠB-TU Ostrava, 2007, 260s. ISBN 978-80-248-1508-4
- [7] JANALÍK, Jaroslav. *Měření tekutinových mechanismů*. 1. Vyd. Ostrava: VŠB-TUO Ostrava, 1995. 152s.
- [8] ĎADO, Stanislav. – BEJČEK, Ludvík. – PLATIL, Antonín. *Měření průtoku a výšky hladiny*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005. 448 s. ISBN 80-7300-156-X
- [9] KOZUBKOVÁ, Milada, a kol. *Mechanika tekutin – návody pro laboratorní měření*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TUO Ostrava, 2007. 113 s.
- [10] SD9000 – Hlídač spotřeby tlakového vzduchu. *ifm*. [online]. 25.06.2013 [cit. 2014-03-15]. Dostupné z: <http://www.ifm.com/products/cz/ds/SD9000.htm>
- [11] HT SYSTÉM ODPADNÍ (VNITŘNÍ). *fepol*. [online]. [cit. 2014-03-18]. Dostupné z: <http://www.fepol.cz/kategorie/voda—instalace/odpadni-a-kanalizacni-/ht-system-odpadni-vnitri/;page=5>